

Modelos de elementos finitos de componentes de autobuses fabricados en materiales compuestos

Dña. Rocío Grimaldi Pastoril

Investigadora, INSIA, España

Dr. Enrique Alcalá Fazio

Director de la Unidad de Autobuses, Autocares y T. Accesible, INSIA, España

RESUMEN

La creciente preocupación por la seguridad en el transporte de pasajeros, ha hecho que las estructuras de los autobuses y autocares se vean sometidas a sollicitaciones cada vez más exigentes, sobre todo ante condiciones de vuelco cuyos requerimientos vienen determinados por el Reglamento 66 de Ginebra. Es por eso que en esta ponencia se pretende presentar una alternativa de pilares de estructura con materiales compuestos para el uso de los mismos como método reductor de masa de los vehículos. Para ello se presentan ensayos a flexión de pilares y modelos de cálculos validados con dichos ensayos.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de los requerimientos estructurales que se les exige a las estructuras de autobuses y autocares, implica que estos evolucionen hacia el uso de nuevas tecnologías para su fabricación. Uno de los mayores avances exigidos a las actuales estructuras es la reciente obligatoriedad del uso de cinturones de seguridad para todos los vehículos de transporte de pasajeros. El uso de los cinturones de seguridad, implica que parte de la masa de los pasajeros quede solidaria al vehículo ante, por ejemplo, el vuelco del mismo.

El comportamiento de la estructura ante dicho accidente, viene determinado según el Reglamento 66 en sus revisiones 0 y 1. En dicha norma se especifica, entre otros factores, la energía mínima que la estructura del vehículo debe ser capaz de absorber bajo condiciones de vuelco. Esta energía es directamente proporcional a las dimensiones principales del vehículo y a su masa en vacío en orden de marcha, que en el caso de uso de cinturones de seguridad por parte de los pasajeros, se ve aumentada por parte de la masa de los propios pasajeros. Este aumento de masa se traduce en un aumento en la energía requerida entre un 25-30% con respecto al mismo vehículo sin el uso de cinturones de seguridad. Este aumento de energía, unido al hecho cada vez más imperioso que los vehículos pesen menos para así disminuir los consumos, ha hecho que se estudien nuevas tecnologías aplicadas a las estructuras para absorber dicho aumento de energía sin penalizar la masa del vehículo.

Hasta el momento, los avances realizados en España en las estructuras de los autobuses y autocares actuales han consistido principalmente en cambios de espesores o cambios de calidades de los aceros o una combinación de ambos. Esto se cambio se producen principalmente en la perfilería encargada de absorber al energía requerida en caso de vuelco,

como son los anillos que conforman la estructura, la zona delantera y la trasera, aunque en general se puede englobar toda perfil que trabaje a flexión, y por tanto absorba energía, en caso de vuelco.

Para evitar este aumento de masa y por tanto de energía requerida, se propone el uso de nuevos materiales en las estructuras de los vehículos, como son los materiales compuestos. Un material compuesto es aquel formado por dos o más tipos de materiales, formando un nuevo material con mejores características mecánicas que los anteriores por separado. En el caso del uso de estos materiales ante solicitaciones estructurales, lo más común es el uso de fibra de vidrio o fibra de carbono unida a una resina epoxi. En este caso se va a estudiar el comportamiento de dos pilares fabricados en fibra de vidrio con resina epoxi, para validar los modelos FE realizados.

Ambos pilares ensayados han sido fabricados manualmente mediante el uso de molde y contra-molde impregnando la resina epoxi mediante inyección. Se muestra en la Fig. 1 - la sección de los pilares relleno de espuma en su interior, y fabricados por INEGI y por TUC-Clausthal. A pesar de que los materiales y las capas son similares en ambas secciones, y de que el proceso de fabricación en ambos casos son similares, se puede apreciar como la geometría de la sección en ambos casos varía.



Fig. 1 - Sección del pilar

2. FUNDAMENTO TEÓRICO UTILIZADO PARA EL CÁLCULO DE MATERIALES COMPUESTOS

Se considera para el cálculo de las características mecánicas del material, que cada capa que compone el laminado es transversalmente isotrópica, con lo que las propiedades transversales a la fibra serán iguales mientras que las longitudinales a ellas diferirán.

Se calcula en este caso las características de una capa unidireccional (UD) mediante las teorías clásicas de materiales compuestos, para su posterior utilización en el programa comercial de elementos finitos ANSYS.

2.1. Cálculo de las características mecánicas

Las características mecánicas de los materiales compuestos se pueden calcular a partir de las características mecánicas de cada uno de los elementos que la componen. La regla de mezclas es la relación más simple y la más usada para el cálculo de las propiedades micro-mecánicas

de una capa unidireccional de fibra más resina. Esta ley establece que las propiedades de una capa UD de material compuesto es la suma de las propiedades de los materiales constituyentes afectadas por su proporción de volumen. Según esto se calcula las propiedades necesarias como:

Modulo de Young a lo largo de la fibra (E_l);

$$E_l = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

Modulo de elasticidad en la dirección transversal del eje de la fibra (E_t):

$$E_t = E_m \left[1 / \left(V_m + \frac{E_m}{E_{ft}} V_f \right) \right] \quad (2)$$

Modulo de cizallamiento (G_{lt}):

$$G_{lt} = G_m \left[1 / \left(V_m + \frac{G_m}{G_{flt}} V_f \right) \right] \quad (3)$$

Modulo de Poisson: representa la contracción de la capa en sentido transversal cuando este está sometido a cargas de tensión en su sentido longitudinal.

$$\nu_{lt} = \nu_f V_f + \nu_m V_m \quad (4)$$

Hay que tener en cuenta que todos los análisis micro-mecánicos son de aproximación, ya que muchas de las propiedades de las fibras y matrices se ven afectadas en los procesos de fabricación, cosa que no se tiene en cuenta dentro de las teorías micro-mecánica.

2.2. Valores utilizados

Según lo expuesto con anterioridad, se han calculado las propiedades de una capa UD de fibra de vidrio con resina Epoxi. Según especificaciones de los fabricantes, se considera que el tanto por ciento de fibra con respecto al de resina es del 50% en volumen. Se muestra en la Tabla 1 - las características mecánicas utilizadas así como los valores de fallo tomados para cada capa.

E_{11} (GPa)	E_{12} (GPa)	μ_{12}	G_{12} (GPa)	G_{23} (GPa)	σ_{lt} (GPa)	σ_{lc} (GPa)	σ_{tt} (GPa)	σ_{tc} (GPa)	F_6 (GPa)
27,29	4,51	0,30	2,31	2,00	1,30	0,23	0,10	0,05	1,15

Tabla 1 - Propiedades mecánicas de una capa UD de fibra de vidrio o de carbono

Para el caso de la espuma, se han tomado propiedades isotrópicas, de manera que:

E (GPa)	0.0013
μ	0.3
d (Kg/m3)	1500

Tabla 2 - Propiedades mecánicas de la espuma.

3. ENSAYOS REALIZADOS

Para simular el comportamiento de los pilares en situaciones vuelco, se realizan los ensayos de los mismos a flexión. De esta manera para un mismo anillo, ante condiciones de vuelco, hay un lado en el que el pilar se ‘abre’ y otro contrario en el que se ‘cierra’. Todos los ensayos presentados en los apartados posteriores, se realizaron en el INSIA-UPM.

3.1. Ensayo de pilar

En este caso para la realización del ensayo se ancla la probeta por uno de sus extremos a un banco de ensayos y se aplica una fuerza en el otro extremo mediante un cilindro hidráulico, de manera que se asegure el funcionamiento del pilar a flexión. En la Fig. 2 - se muestra la disposición tomada para el ensayo, así como los sensores utilizados para los que se va a obtener la curva fuerza – desplazamiento obtenida.

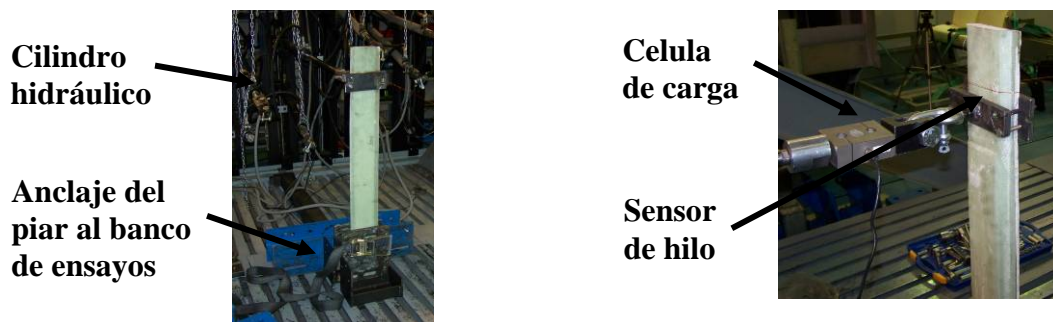


Fig. 2 - Configuración del ensayo de flexión

Se muestra en las siguientes figuras los resultados de los ensayos cuando están abriendo o cerrando.

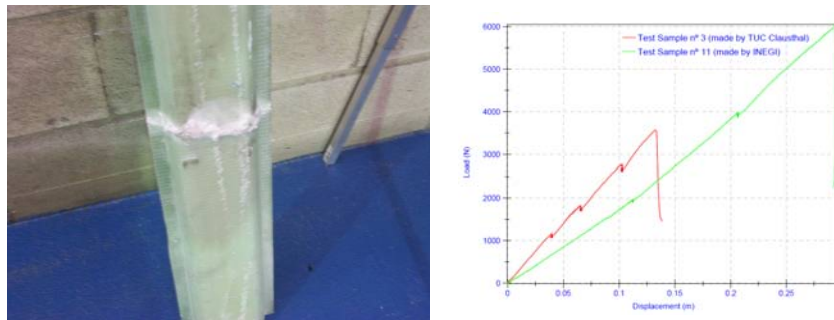


Fig. 3 - Resultado ensayo abriendo

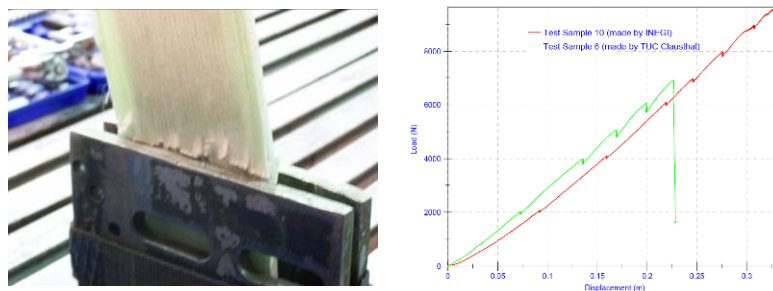


Fig. 4 - Resultado ensayo pilar cerrando

En ambos casos el fallo se produce por rotura de fibra y matriz en la zona de sujeción de la muestra de ensayo debido, principalmente al sistema de anclaje de la probeta.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

Para simular el comportamiento de los pilares ensayados, se han realizado modelos de elementos finitos en el programa comercial ANSYS en su versión 12.0.

Para simular las características de la espuma de relleno se ha utilizado un elemento tipo volumen formado por 20 nodos y con tres grados de libertad por nodo, correspondientes a las translaciones en cada eje de coordenadas, x, y y z. Este tipo de elemento es capaz de asumir comportamientos plásticos, grandes deformaciones y grandes tensiones. En la Fig. 5 - se puede observar en color azul la espuma modelada con elemento volumen. En esta misma figura, la zona en rojo simula la piel del pilar.

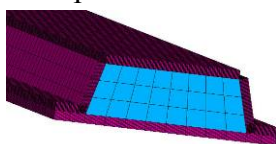


Fig. 5 - Modelo de elementos finitos

Para simular el comportamiento de la piel, se ha utilizado elementos tipo placa de 8 nodos con seis grados de libertad en cada nodo. Este tipo de elemento no solo permite reproducir el comportamiento ortotrópico del material, sino que también permite la introducción de las características constructivas de cada capa, a saber, espesor, dirección de la fibra y material utilizado en cada una de ellas. En la Fig. 6 - se puede apreciar el modelo de la sección de la piel del perfil así como un detalle de las capas introducidas en la zona superior de la sección.

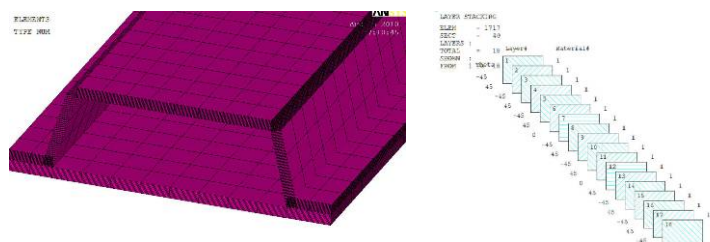


Fig. 6 - Modelo de la piel

Las condiciones de contorno aplicadas durante el ensayo del pilar consistieron en el anclaje del mismo mediante dos placas de acero por su parte inferior, mientras que por su parte superior se aplica la carga mediante chaspas y tornillos tal y como se muestra en la Fig. 2 - . Aunque no se aprecie en las imágenes anteriores, las placas de anclaje no estaban totalmente pegadas al pilar por su parte más superior, al no ser estas rectas, sino que estaban separadas de este unos 5mm. Esto significa que el pilar no empezó a tocar las placas al principio de la aplicación de la carga, sino cuando este ya había girado cierto ángulo. Para simular esta situación se ha optado por introducir un bloque rígido representando la placa, separado del pilar 5mm.

Para que el modelo reconozca la influencia de este a medida que se aplica la carga, se han usado elementos de contacto entre el pilar y el bloque (ver Fig. 7 -). El elemento de contacto utilizado es capaz de simular tanto contactos como deslizamiento entre dos piezas, tanto en 2D como en 3D. Se sitúa entre los nodos intermedios de los elementos tipo placa y tipo volumen utilizados en este caso.

Para la aplicación de la simulación de la carga se han aplicado desplazamientos en el borde superior del perfil, cuya dirección ha dependido del tipo de ensayo realizado (abriendo o cerrando).

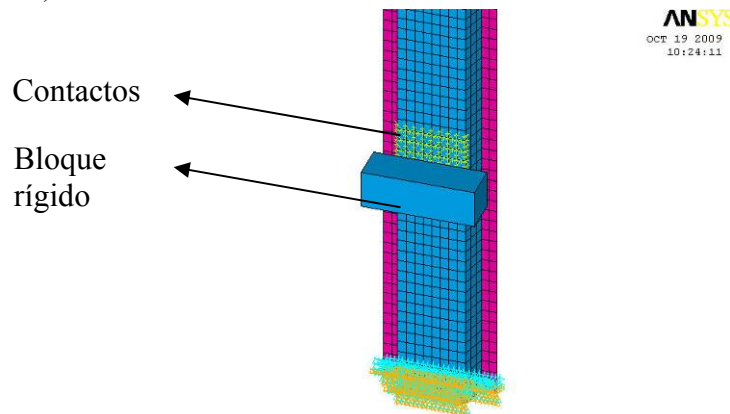


Fig. 7 - Condiciones de contorno

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Según las especificaciones del fabricante, se introdujeron los valores de las características del material suponiendo que el volumen de fibra era de un 50% con respecto al de resina. De esta forma la curva fuerza desplazamiento obtenida en el modelo de elementos finitos quedaba muy por encima de la obtenida según los ensayos realizados.

Es por esto que se realizó un modelo paramétrico cuyo parámetro de diseño es el volumen de fibra, que varía de entre un 20% y un 45% incrementando dicho volumen en 5 unidades cada vez. Una vez seleccionado el volumen de fibra, se recalculan las propiedades de una capa unidireccional de material según las ecuaciones citadas en el apartado 2.1 del presente artículo y se introduce en las características mecánicas de la capa, creando un nuevo material por vez. Para cada volumen de fibra seleccionado se soluciona el modelo de elementos finitos y se obtiene al curva fuerza-desplazamiento, para posteriormente compararla con la del ensayo.

Una vez realizado el cálculo con todos los volúmenes de fibras estudiados se obtiene que los volúmenes de fibra que más se aproximan a la realidad son:

	‘Abriendo’		‘Cerrando’	
	Sample nº3	Sample nº 11	Sample nº 6	Sample nº 10
% Vf del FEM	0.35	0.25	0.25	0.2

Tabla 3 - Volumen de fibra utilizado para el cálculo

En las siguientes figuras se puede compara las curvas de fuerza-desplazamiento y momento-ángulo girado, obtenidas en los ensayos con las calculadas según el modelo FE con el volumen de fibra ajustado.

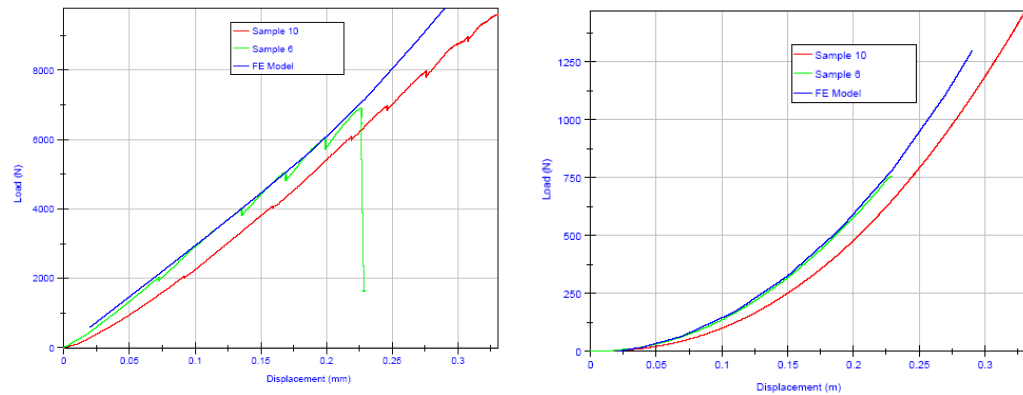


Fig. 8 - Comparación de curvas cuando el pilar está ‘abriendo’

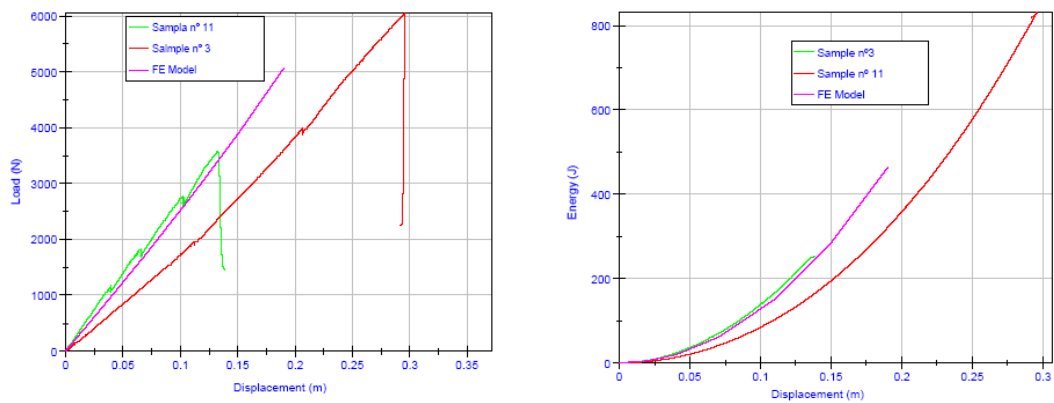


Fig. 9 - Comparación de curvas cuando el pilar está ‘cerrando’

En las siguientes figuras se muestra la intensidad de tensión obtenidas en cada caso

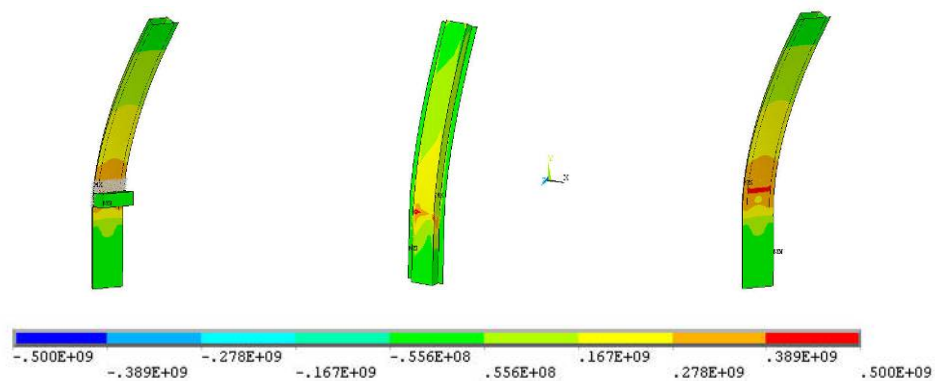


Fig. 10 - Pilar abriendo

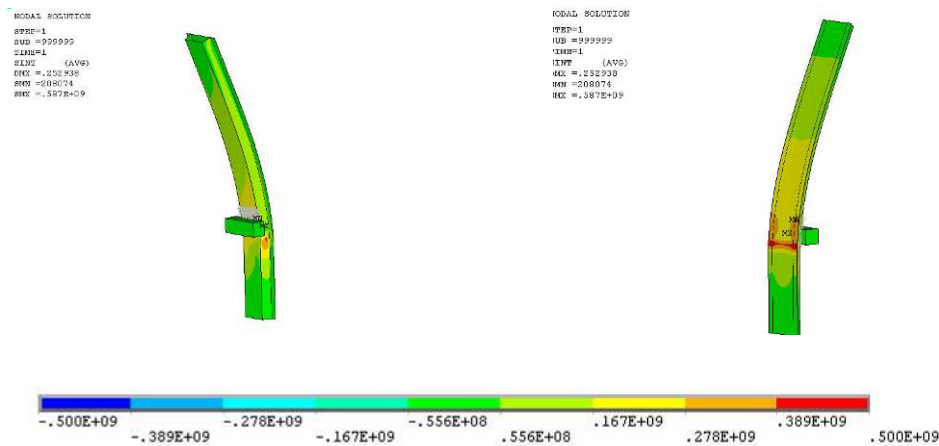


Fig. 11 - Pilar cerrando

6. CONCLUSIONES

El modelo realizado permite reproducir el comportamiento del pilar con respecto al ensayo realizado, realizando un estudio paramétrico según la variación del volumen de fibra. Se ha demostrado que el tipo de fabricación influye en gran medida en los resultados obtenidos. En este caso es probable que se tuviera problemas al hacer al vacío de la pieza.

REFERENCIAS

- [1] EVER J. BARBERO (1999). *Introduction to composite Material Desing*, Taylor and Francis Group, New York
- [2] *Reglamento N°66R01*
- [3] *LITEBUS*, Proyecto Europeo englobado dentro del sexto programa marco (2006-2009)
- [4] GARCIA GARCIA, A; VICENTE CORRAL, T; SANCHEZ LOZANO, M: "Impact of the use of safety belts on the structural requirements under rollover of coaches", *Internacional Journal of Heavy vehicle systems. ISSN (Online) 1741-5152 (print) 1744-232X. Volumen 13, Issue 3. pp 163-169. 2006*
- [5] SHIUH-CHUAN HER y YU-CHENG LIANG (2004). Finite element analysis of composite laminates and shell structures subjected to low velocity impact. *Composite Structures*
- [6] H.SUN, S. RAJENDRAN Y D.Q. SONG (1998). Finite element analisis on delamination fracture toughness of composite specimens. *2nd Asian ANSYS User Conference, Singapore.*